

# 扁平纵向翅片管换热器的传热特性分析及结构优化

雷露晓,王政伟\*,纪国剑

(常州大学石油与天然气工程学院能源学院,江苏常州 213164)

**摘要:**为进一步优化传统纵向翅片管换热器的传热性能,提出了一种扁平纵向翅片管换热器。基于传热流动基础理论,建立扁平纵向翅片管的物理模型,给出相关传热计算公式,优化扁平管和翅片的结构参数。进一步将扁平翅片管和圆管翅片管以及组成换热器的换热性能进行比较分析,结果表明,等截面同翅片结构参数下单位体积内气侧换热面积增加1.5倍,同质热负荷下换热器的体积减少50%以上,结构紧凑,具有较好的综合优势,为该换热器的推广应用提供参考。

**关键词:**扁平管;纵向翅片管;换热器;传热特性;结构优化

中图分类号:TK172

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)10-0221-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.10.041

## Heat transfer characteristics analysis and structure optimization of flat longitudinal finned tube heat exchanger

LEI Lu-xiao, WANG Zheng-wei\*, JI Guo-jian

(School of Energy, School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:**In order to further optimize the heat transfer performance of traditional longitudinal finned tube heat exchanger, a flat longitudinal finned tube heat exchanger is proposed. Based on the fundamental heat transfer flow theory, a physical model is established for the flat longitudinal finned tube, the relevant heat transfer equations are given, and the structural parameters of flat tubes and fins are optimized. Heat transfer performances of flat finned tube and round finned tube as well as the composed heat exchangers are compared and analyzed. Results show that the heat transfer area per unit volume of the gas side increases by 1.5 times under the same fin structure parameters and equal cross section, and the volume of the heat exchanger is reduced by more than 50% under the homogeneous heat load. Flat finned tube heat exchangers have compact structure, and better comprehensive advantages, which showing great potentials in popularization.

**Key words:** flat tube; longitudinal finned tube; heat exchanger; heat transfer characteristics; structure optimization

纵向翅片换热器的翅片布置方向与换热管方向保持一致,因其具有可实现纯逆流换热、不易积灰、阻力损失小等优点,适用于高温、多杂质、强腐蚀以及大流量工质的换热过程,因而被应用于石油<sup>[1-2]</sup>、化工、电子等行业。如圆管纵向翅片管较早应用于石油集输系统中,在管壳式换热器中增加壳程管外对流换热系数;在大型锅炉过热器和再热器<sup>[3-4]</sup>中,通过在流动方向加装纵向翅片可防磨防腐并提升换热性能。传统的气-液纵向翅片管换热器的传热管多为圆形,通过在换热管外侧增加沿流动方向的翅片来增大管外气侧对流换热系数。但由于圆管纵向翅片管存在翅化比低、制作工艺不成熟、布置困难、留空率高、体积庞大等缺点,应用受限。因此,为克服圆管纵向翅片管换热器的不足,本文中提出一种结构创新的扁平纵向翅片管换热器<sup>[5]</sup>,换热管截面为扁平状。

## 1 扁平纵向翅片管换热器结构和特点

扁平纵向翅片管换热器结构如图1所示。

扁平纵向翅片管阵列布置在换热箱体内,管内为液相介质,气体在管外翅片间隙内流动,换热管的两端分别与分流管和汇流管连通,分流管和汇流管的两端与进口总管和出口总管连通。液体首先从换热总管流入分流管,经过分流管上的椭圆缝隙分流进入各个扁平翅片管内,经对流换热降温后,再流入汇流管和出口总管,进入下一流程继续换热降温,最终从液相出口流出;气体从进口流入箱体内各换热管翅片间隙流道,吸热升温,经过转向流道进入下一流程,经多程换热后的气体从换热箱体上方出口流出,完成气-液的热量交换过程。该换热过程可增加冷热流体进出口的温差,分流管和汇流管采用椭圆管可增加进口和出口处的气体的流通面积。

收稿日期:2023-12-21;修回日期:2024-08-09

作者简介:雷露晓(1999-),女,硕士生;王政伟(1961-),男,硕士,教授,研究方向为化工系统节能技术、高温蓄热技术,通讯联系人, wangzhw@cczu.edu.cn。

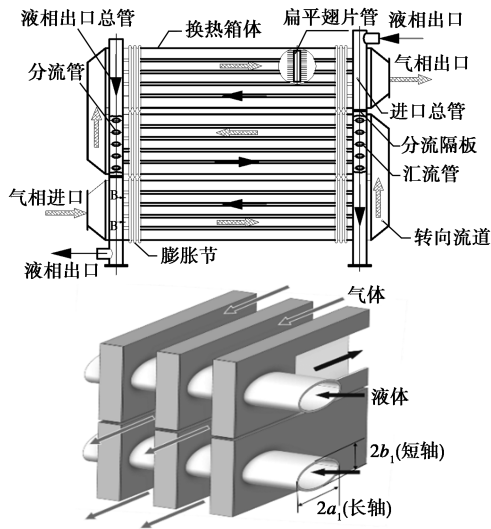


图 1 扁平纵向翅片管换热器结构图及局部图

换热器的特点: 冷热流体实现多程纯逆流换热, 流体流向相反, 平均传热温差大; 扁平管可布置密集型纵向翅片, 翅化比高; 翅片管并排布置, 流通截面上无留空或气体走廊; 翅片管具有高的强度和刚度, 可制成大尺寸; 因此扁平管翅片换热器可用于气体流量大、杂质多、成分复杂和温升高的场合, 结构紧凑、空间利用率高、阻力损失小, 综合优势显著, 应用前景广泛。

## 2 传热性能分析与结构优化

### 2.1 扁平纵向翅片管换热器传热性能分析

为方便研究, 对换热过程做进一步简化, 只分析扁平翅片管的换热情况, 并以充分换热阶段为研究对象, 建立物理模型, 如图 2 所示, 其中, 扁平管长度为  $a$ , 宽度为  $b$ , 长宽比  $n = a/b$ 。

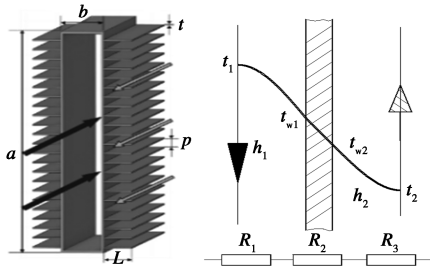


图 2 扁平纵向翅片管结构图和换热过程简化图

管内液体冷却时湍流对流换热系数  $h_1$ :

$$h_1 = (\lambda_1/d_{e1}) \times \left\{ \left[ \frac{f}{8} (Re_1 - 1000) Pr_1 \right] / \left[ 1 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr_1^{2/3} - 1) \right] \right\} \quad (1)$$

$$f = (1.82 \lg Re_1 - 1.64)^{-2} \quad (2)$$

式中,  $Re = 2300 \sim 10^5$ ,  $Pr = 0.6 \sim 10^5$ ,  $l/d > 60$ 。

$d_{e1}$  为扁平管的当量直径, 按下式计算:

$$d_{e1} = 4F_1/U_1 = 4ab/2(a+b) = 2b[1 - 1/(n+1)] \quad (3)$$

管外气体加热纵向冲刷对流换热系数  $h_2$ :

$$h_2 = 0.023(\lambda_2/d_{e2}^{0.2})(w_2/v_2)^{0.8} Pr_2^{0.4} \quad (4)$$

其中, 当量直径  $d_{e2}$  按下式计算得到:

$$d_{e2} = 4F_2/U_2 = 4(AB - Zab)/[2(A+B) + 2Z(a+b)] \quad (5)$$

式中,  $A, B$  分别为流道的长和宽;  $Z$  为流道中布置扁平管的根数。

气-液换热过程的传热量按下式计算:

$$Q = KF\Delta t_m = F\Delta t_m/R \quad (6)$$

式中, 传热系数  $K$  按下式计算:

$$1/K = [1/h_1 + \lambda/\delta + 1/(h_2\beta\eta_f)] = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  和  $\delta$  为扁平管的导热系数和壁厚;  $\beta$  和  $\eta_f$  为扁平管的翅化比和翅化效率。

换热过程为纯逆流过程, 平均对数温差为:

$$\Delta t_m = [(t_1'' - t_2') - (t_1' - t_2'')] / \ln[(t_1'' - t_2') / (t_1' - t_2'')] \quad (8)$$

式中,  $t_1', t_1'', t_2', t_2''$  为热、冷流体的进出口温度。

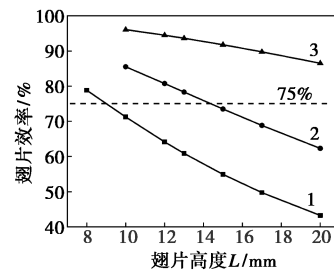
### 2.2 翅片结构优化

图 2 左侧为扁平翅片管翅片结构示意图, 翅片高度  $L$ 、厚度  $t$ 、节距  $p$ 。翅片效率  $\eta_f$  为翅片表面的实际散热量与假定翅片表面温度等于翅根温度时的散热量的比值, 计算公式如下:

$$\eta_f = Q_f/Q_0 = (\tanh mL/mL)mL = [L + (1/2)t] \sqrt{2h_0/\lambda t} \quad (9)$$

式中,  $t$  为翅片厚度, 由气体是否含有杂质、腐蚀性、制造工艺、材料价格来确定, 对于干净空气, 可取  $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ , 对于烟气可取  $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ ;  $h_0$  为气体换热系数, 空气对流换热系数为  $30 \sim 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\lambda$  为翅片的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 与翅片材质有关;  $Q_f$  为翅片实际散热量;  $Q_0$  为假定翅片各处温度都等于翅根温度时的散热量。

翅片材质、翅片高度是影响翅片效率的主要因素。图 3 反映翅片材质及高度对翅片效率的影响



1—不锈钢; 2—碳钢; 3—铝合金

图 3 材质及高度对翅片效率的影响

(取  $t=0.5, h_0=50$ ):翅片效率随导热系数增大而增大,随着翅片高度增加而下降。工程上一般要求翅片效率在 75% 以上。

翅化比  $\beta$  为增加翅片后,换热面积扩展的倍数,图 4 为不同的翅片结构<sup>[6]</sup>,相关计算如下。

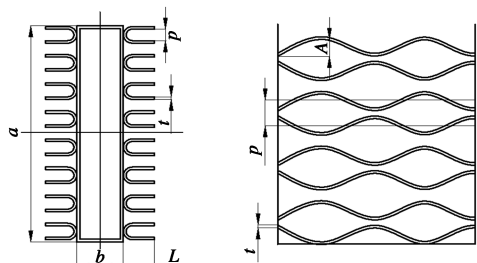


图 4 扁平管不同翅片结构

矩形直翅片翅化比计算公式如下:

$$\beta_a = (A_f + A_b) / A_0 = [2L / (p + t)] [1 - 1 / (n + 1)] + 1 \quad (10)$$

U 形直翅片的翅化比计算如下:

$$\beta_a = \{2[0.285(p + t) + L] / (p + t)\} [1 - 1 / (n + 1)] + 1 \quad (11)$$

矩形正弦波纹翅片的翅化比计算如下:

$$\beta_c = B [2L / (p + t)] [1 - 1 / (n + 1)] + 1 \quad (12)$$

$$B = (1 / \pi) [A \sqrt{1 + A^2} + \ln(A + \sqrt{1 + A^2})] \quad (13)$$

式中,  $A_f$  为翅片的换热面积,  $m^2$ ;  $A_b$  为翅片之间的裸管面积,  $m^2$ ;  $A_0$  为基管外表面积,  $m^2$ ;  $p$  为翅片间距。

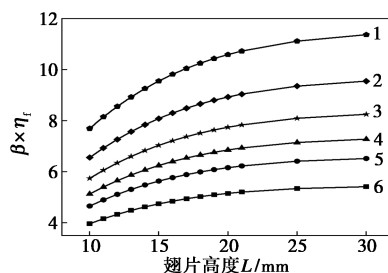
从计算公式(10)可以得出,  $n$  越大,即管子越扁,翅化比越高,但当  $n$  大于 15 时,增加值小于 6%。翅片间距  $p$  越小,翅化比越大,间距  $p$  主要由制造工艺和气体特性来确定,一般取 2~5 mm。

表 1 给出 3 种翅片材质的导热系数、特点及应用场,同时结合图 3 在表中给了 3 种材料的翅片高度的优选范围。

表 1 翅片优选使用表

材质	导热系数	优选翅高 $L$	主要特点	应用场合
碳钢	40	10~15	高强度、耐磨损、耐中温、价格低	中低温烟气, 中低温空气
铝合金	170	15~20	材质轻、强度低、价格高	低温空气或腐蚀性气体
不锈钢	16	8~10	耐高温、耐腐蚀、价格高	高温空气、高温腐蚀性气体

翅片结构参数的优化主要依据翅片综合指标  $\beta\eta_f$  值来确定。图 5 为翅片高度、翅片节距对翅片综合性能指标的影响,可以看出,间距  $p$  越小,  $\beta\eta_f$  值越大,当翅片高度  $L > 20$  时,综合指标值趋于稳定。



1— $p=2.0$  mm; 2— $p=2.5$  mm; 3— $p=3.0$  mm; 4— $p=3.5$  mm; 5— $p=4.0$  mm; 6— $p=5.0$  mm

图 5 翅片综合性能随翅片高度的变化

### 2.3 扁平传热管结构优化

单根扁平管的对流换热热量:

$$Q = 2(a + b)h_1\Delta t = 2b(n + 1)h_1\Delta t \quad (14)$$

沿程阻力计算公式:

$$\Delta p = f(L_0 / d_e) (\rho v^2 / 2) \quad (15)$$

从计算式(1)、(3)、(14)、(15)可看出,  $n$  越大,即管子越扁,当量直径越大,当  $n$  大于 10 时,增加值小于 10%;当  $d_e$  变大时,换热系数降低,阻力变小,但这些影响随着  $n$  大于 10 就变得较小,相反换热热量随  $n$  线性增加,因此综合考虑制造工艺,工程上可选用  $n=10\sim 15$ ,宽度  $b$  的确定主要根据制造工艺和使用场合,可选用  $b=10\sim 20$  之间。

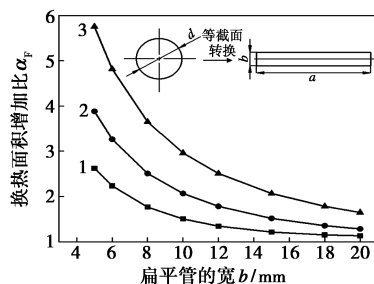
### 3 换热管截面形状对换热器传热性能的影响

#### 3.1 换热管截面形状对换热面积的影响

扁平管的优势在于,在截面积相等情况下,扁平管的周长大于圆管周长,在其他同等条件下,用扁平管代替圆管,可增加换热面积。换热面积增加比  $\alpha_F$  的计算公式如下:

$$\alpha_F = 2(a + b) / \pi d = d / 2b + 2b / \pi d \quad (16)$$

宽度  $b$  变化对换热面积增加比  $\alpha_F$  的影响如图 6 所示。可看出,扁平管越扁,换热面积增加得越多;管径越大,换热面积增加比  $\alpha_F$  越大,用扁平管代替圆管换热面积增加效果更好。



1— $\phi 25$ ; 2— $\phi 38$ ; 3— $\phi 57$

图 6 换热面积增加比变化图

### 3.2 传热管截面形状对空间利用率的影响

换热器的空间利用率可用单位体积内气侧的换热面积值来表示,该值越大,表示换热器空间利用率大,结构更紧凑。如图 7 所示,对等面积且加装相同翅片尺寸的 2 种管形进行比较。圆管纵向翅片管的单位体积内气侧的换热面积为单位长度的传热面积与占有的空间体积之比:

$$A_{v1} = (\beta_1 \pi d) / [\pi(d + 2L)^2 / 4] \quad (17)$$

其中,圆管的翅化比  $\beta_1$  为:

$$\beta_1 = [\pi d / (p + t)] [(2L + p + t) / \pi d] = 1 + 2L / (p + t) \quad (18)$$

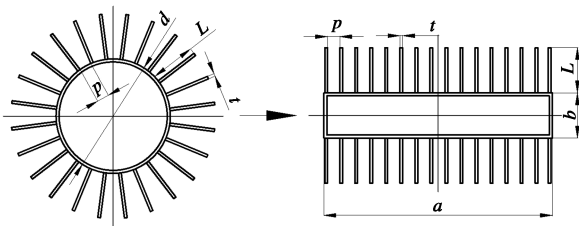


图 7 2 种翅片管传热管截面形状示意图

扁平纵向翅片管单位体积内气侧换热面积:

$$A_{v2} = [2\beta_2(a + b)] / [a(b + 2L)] \quad (19)$$

扁平管的翅化比  $\beta_2$ :

$$\beta_2 = 2La / [(p + t)(a + b)] + 1 \quad (20)$$

选定翅片结构参数  $L = 13, p = 3.0, t = 0.5$ , 以 3 种管径的圆管转换为等截面扁平管,分析扁平管与圆管单翅片管的单位体积内气侧的换热面积比,如图 8 所示,得出,管径越大,用相同截面积的扁平管代替圆管,所获得的单位体积内换热面积越大;扁平管越扁,单位体积内气侧的换热面积越大,为圆管的 1.5 倍左右,空间利用率更高,结构更加紧凑。

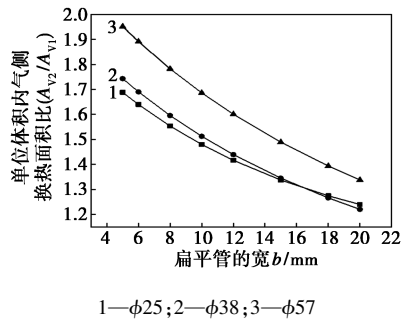


图 8 单位体积内换热面积变化图

### 3.3 传热管截面形状对流通截面留空率的影响

图 9 为扁平纵向翅片管并排布置和圆管纵向翅片管叉排布置图,可以看出,扁平纵向翅片管换热器空间紧凑,留空率为零;圆管翅片管换热器由于结构特点,不宜顺排布置;当叉排正三角排列时,存在较

大的留空形成气体走廊,各留空面积与流通面积的占比可按式计算确定:

$$A_1 = (\sqrt{3}/2)n_1 m_1 (d + 2L + \delta)^2 - (\pi/4)n_1 m_1 d^2 \quad (21)$$

$$A_2 = (\sqrt{3}/4)(d + 2L + \delta)^2 - \pi d^2 / 8 \quad (22)$$

$$A_3 = (\sqrt{3}/4)(d + 2L + \delta)^2 - \pi(d + 2L)^2 / 8 \quad (23)$$

$$A_4 = [\sqrt{3}(d + 2L + \delta)^2] / 2 - \pi(d + 2L)^2 / 8 \quad (24)$$

$$A_5 = (d + 2L + \delta)^2 / 2 - \pi(d + 2L)^2 / 8 \quad (25)$$

$$\eta_1 = A_3 / A_2 = [2\sqrt{3}(d + 2L + \delta)^2 - \pi(d + 2L)^2] / [2\sqrt{3}(d + 2L + \delta)^2 - \pi d^2] \quad (26)$$

$$\eta_2 = [2(n_1 - 1)(m_1 - 1)A_3 + (2m_1 - 1)A_4 + (2n_1 - 1)A_5] / A_1 \quad (27)$$

式中,  $A_1$  为整个流通面积;  $A_2$  为正三角形内气体流通面积;  $A_3$  为正三角形内留空面积;  $A_4$  为叉排横向边际留空面积;  $A_5$  为纵向边际留空面积;  $\delta$  为制造偏差和安装的翅片间隙;  $\eta_1$  为正三角形内计算的留空率;  $\eta_2$  为整个换热器截面计算的留空率。

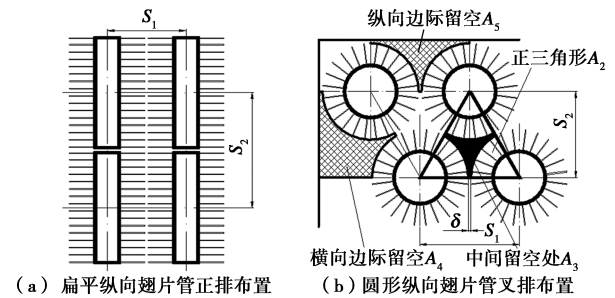


图 9 2 种翅片管空间布置图

分析 3 种管径在不同翅片高度情况下的留空率  $\eta_1$  和  $\eta_2$ , 如图 10、图 11 所示,管径越大,留空率越

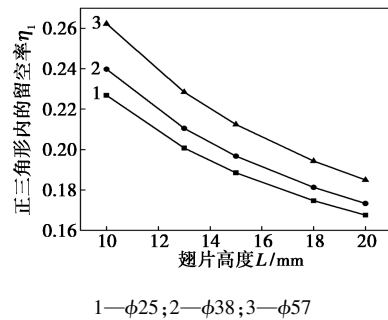


图 10 正三角形内留空率变化图

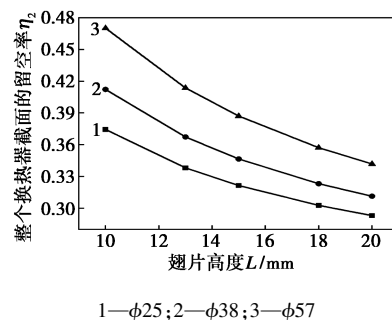


图 11 整个换热器截面留空率变化图

大;但随着翅片高度增加,留空率减小。

当  $d = 38$ ,  $L = 15$ ,  $\delta = 2$ ,  $n_1 = m_1 = 10$  时,  $\eta_1 = 19.7\%$ ,  $\eta_2 = 34.65\%$ 。圆形翅片管换热器整体截面上有 35% 的气体从走廊流过,大大降低换热器总体换热效果。由于存在较大留空,且在进口处的液相分流管需错位布置才能使气体流进流出,因此这种换热器在工程上应用较少。

### 3.4 工程实例计算分析比较

选取高温熔盐和空气作为换热介质进行研究,管内流体为熔盐,管外流体为空气,对 2 种流体的传热过程进行分析计算。按照工业设计要求,空气入口温度为  $150^\circ\text{C}$ ,出口达到  $380^\circ\text{C}$  左右;熔盐入口温度  $400^\circ\text{C}$ ,假设各个扁平管流道内的流体流速均等。熔盐选取为三元硝酸盐,物性参数参考《Molten salts database for energy applications》<sup>[7]</sup>,以平均温度为定性温度,进行传热性能分析<sup>[8-11]</sup>。

根据上述工程设计要求,在同换热量、同流速情况下,分别用圆管翅片管和具有相同截面积的扁平翅片管设计换热器,选取大小尺寸(表 2) 2 种情况,进行分析计算比较。

表 2 2 种换热器设计参数和计算结果比较

计算结果	小尺寸换热管		大尺寸换热管	
	圆管	扁平管	圆管	扁平管
规格	$\phi 38$	$a/b = 113/10$	$\phi 57$	$a/b = 212/12$
换热量/kW	1278	1278	2539	2539
迎风面高/m	0.8	0.8	1.2	1.2
迎风面宽/m	0.8	0.8	1.2	1.2
管长/m	4	2	4.2	2
熔盐流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.2	0.2	0.28	0.28
空气流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	12.71	12.71	11.23	11.23
布置管子数	$16\times 12$	$7\times 22$	$15\times 14$	$5\times 31$
空气侧阻力/Pa	1460.78	651.54	1106.46	513.66
传热系数/( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )	186.74	211.61	212.87	218.22
换热面积/ $\text{m}^2$	91.68	69.61	157.94	131.44
热流密度/( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$ )	13.94	18.37	16.08	19.32
传热面积密度	18.56	27.51	17.89	34.86
换热器长/mm	4200	2200	4400	2200
换热器宽/mm	992	1036	1390	1533
换热器高/mm	1186	1110	1443	1118
实际体积/ $\text{m}^3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
	4.94	2.53	8.83	3.77
体积比	$V_1/V_2 = 1.95$		$V_3/V_4 = 2.34$	

从表 2 计算结果得出,在同等条件下,扁平纵向翅片管换热器的体积更小,单位体积内气侧的传热面积增加 50% 以上,使换热器整体的结构更加紧凑;管径较大时用扁平管代替圆管效果更好。

## 4 结论

提出了一种新型扁平纵向翅片管换热器;用流通截面相等的扁平传热管代替圆管传热管;此外,论证扁平管的传热优势并对扁平纵向翅片管换热器进行实例计算,具体结果如下。

(1) 扁平管最佳长宽比  $n = 10 \sim 15$ , 其中,宽度  $b = 10 \sim 20$ ;翅片结构优化参数: $L = 10 \sim 15$ ,  $p = 2 \sim 5$ ,  $t = 0.5 \sim 1.0$ , 该结构下可达到较优的换热效果。

(2) 在翅片几何参数和管截面积相等的条件下,单根扁平纵向翅片管单位体积内气侧的换热面积比圆管翅片管大 1.5~2.0 倍,空间利用率更高,结构更紧凑。

(3) 在同等条件下,圆管纵向翅片管换热器的整体体积大于扁平纵向翅片管换热器的整体体积 2 倍以上。

## 参考文献

- [1] 仇性启,李华玉,陈彦泽,等.纵向翅片管管外换热与阻力特性的实验研究[J].石油机械,2001,29(3):8-10.
- [2] 杨宝山,张伟.纵向翅片管式换热器的失效分析及改造措施[J].油气储运,2005,(3):44-46.
- [3] 宋克伟,刘松,王良璧.扁管换热器内纵向涡强度与换热强度对应关系[J].化工学报,2016,67(5):1858-1867.
- [4] 何扬静.用于快速供应生活热水的紧凑型相变蓄热器性能研究及优化[D].广州:华南理工大学,2022.
- [5] 王政伟,雷露晓,纪国剑.一种高温气液扁平翅片管换热器:CN115930641A[P].2023-04-07.
- [6] 李晓娟,钱锦远,陈珉芮,等.微通道换热器结霜现象的研究进展[J].现代化工,2017,37(11):47-50.
- [7] Serrano-López R, Fradera J, Cuesta-López S. Molten salts database for energy applications[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification,2013,73(73):87-102.
- [8] 刘闯,欧阳新萍.直条缝翅片管换热器传热与流动阻力性能研究[J].热能动力工程,2023,38(3):133-140.
- [9] 姜峰,韩妮莎,齐国鹏,等.气-固循环流化床换热器的传热性能与压降[J].化学工业与工程,2021,38(3):36-48.
- [10] 高森,郑朴,赵兆瑞,等.新型无霜空气源热泵的除湿换热器性能[J].化学工程,2022,50(4):63-67.
- [11] 沈洋.乙二醇装置环氧乙烷进料/产品换热器选用方案的比较分析[J].现代化工,2021,41(S1):340-341.■